TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Terças e Quintas de 8:00 às 10:00 hs

Prof. Tania S. Klein

tania@eq.ufrj.br

Lab CFD

Aulas 18 e 19

❖ Trocadores de Calor

- ❖ Introdução
- ❖ Disposição das Correntes
- ❖ Tipos de Trocadores de Calor
- ❖ Coeficiente Global de Transferência de Calor
- ❖ Média Logarítmica da Diferença de Temperatura (MLDT)
- ❖ Condições Especiais
- ❖ MLDT para Passes Múltiplos e Correntes Cruzadas
- ❖ Método da Efetividade de NUT
- ❖ Metodologia de Cálculo de um Trocador

Exercícios do cap. 11: 13, 16, 24, 26, 31, 34, 35, 38, 39, 45, 46, 49, 50, 53, 55, 60, 68, 69, 71

Trocadores de Calor

Introdução

- Equipamentos amplamente utilizados em todas as indústrias para troca de calor entre dois fluidos que estão a temperaturas diferentes. Neste capítulo, vamos nos restringir à trocadores onde os fluidos são separados por uma parede sólida.

- O fluido que entra com maior temperatura é chamado de fluido quente. O que entra com menor temperatura é o fluido frio. O fluido quente será resfriado e o frio, aquecido.

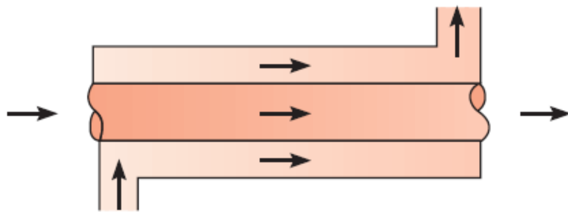
- O arranjo do escoamento dos fluidos, ou seja, a disposição das correntes, afeta a troca térmica, conforme discutiremos mais detalhadamente.

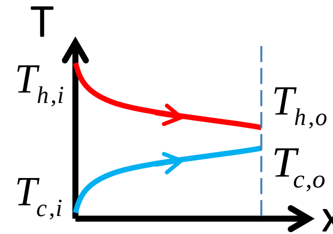
- Trocadores de calor podem ter ou não aletas, assim como internos para promoverem maior troca térmica ou promoverem maior suporte à estrutura.

Disposição das Correntes

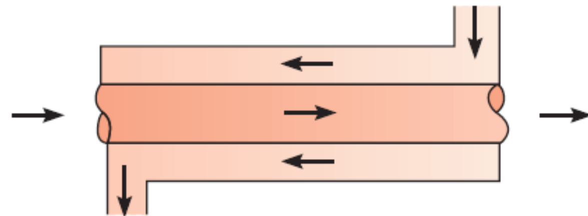
As correntes dos fluidos frio e quente podem ser:

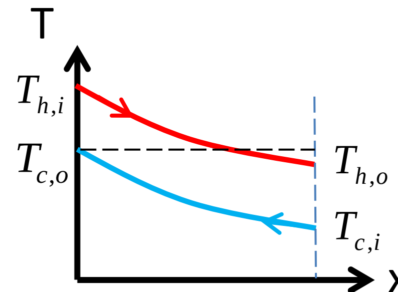
- paralelas: entram na mesma extremidade, escoam na mesma direção e saem na mesma extremidade;



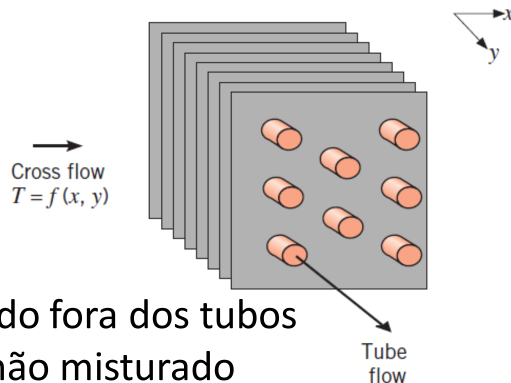


- contrárias: entram em extremidades opostas, escoam em direções opostas e saem em extremidades opostas.

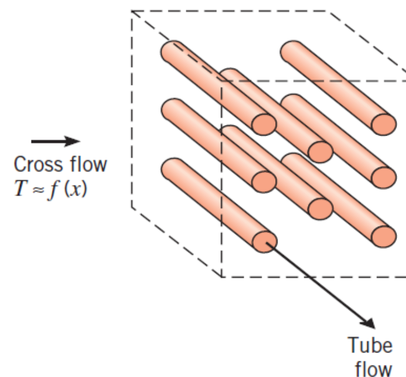




- cruzadas: uma perpendicular à outra.



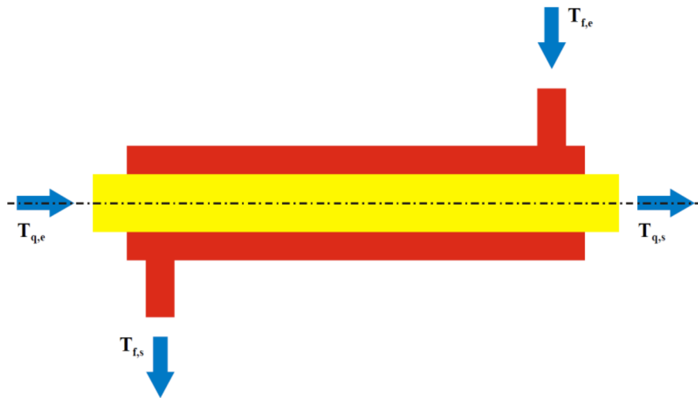
Fluido fora dos tubos
→ não misturado

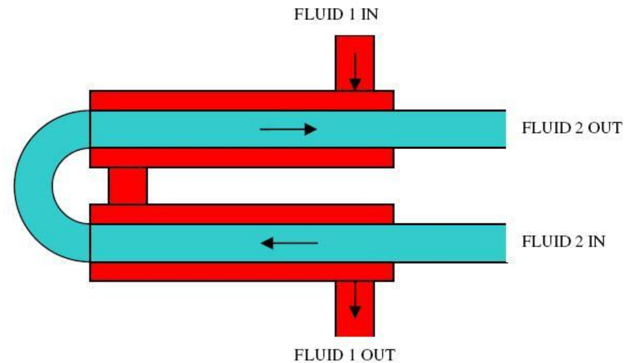


Fluido fora dos tubos
→ misturado

Tipos de Trocadores de Calor

1) Tubos Concêntricos (Hairpin)





http://www.enggcyclopedia.com/2011/05/heat-exchanger-types/



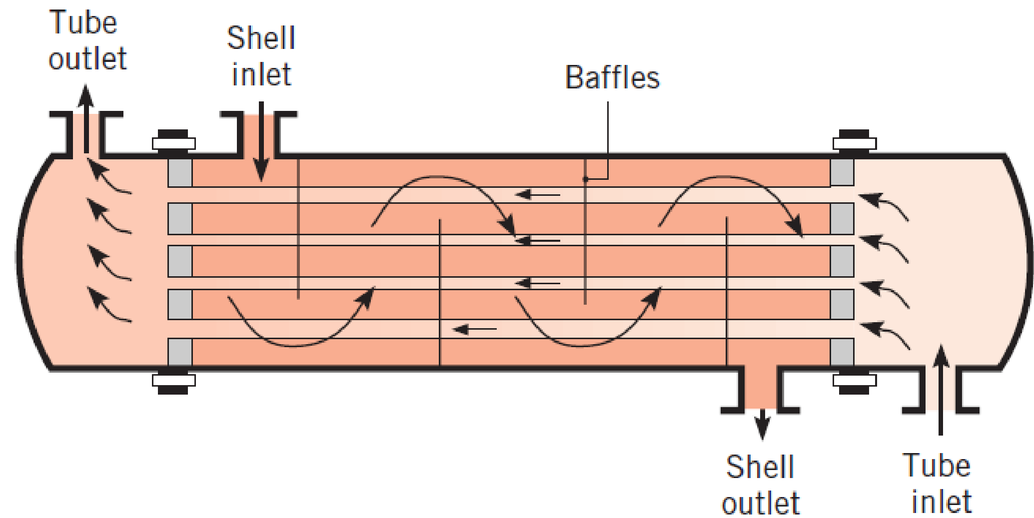
http://www.rwholland.com/hairpin.html

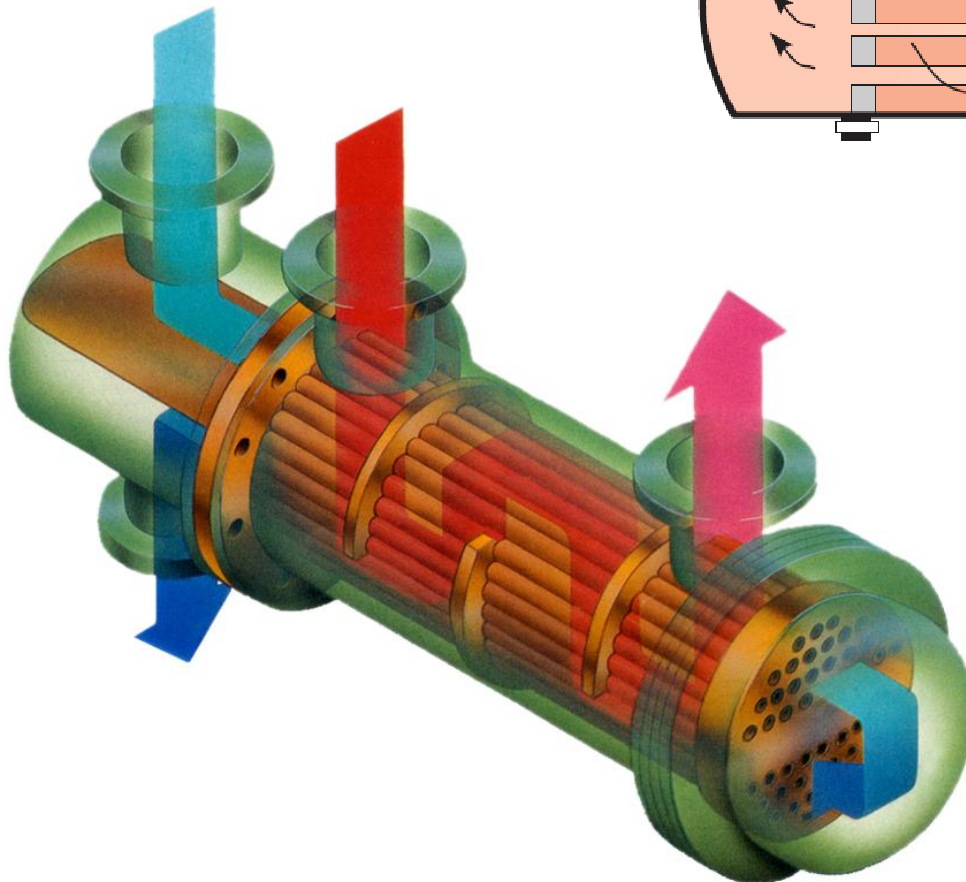


http://www.jcequipments.com/double-pipe-heat-exchanger.html

Tipos de Trocadores de Calor

2) Casco e Tubo

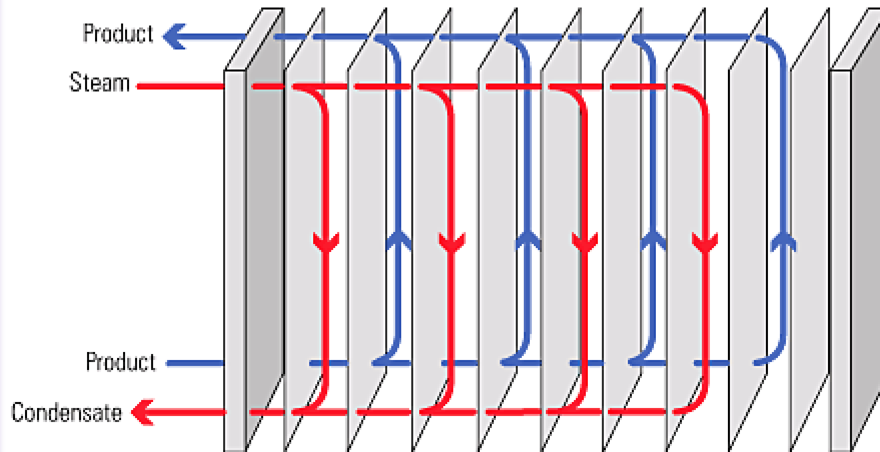






Tipos de Trocadores de Calor

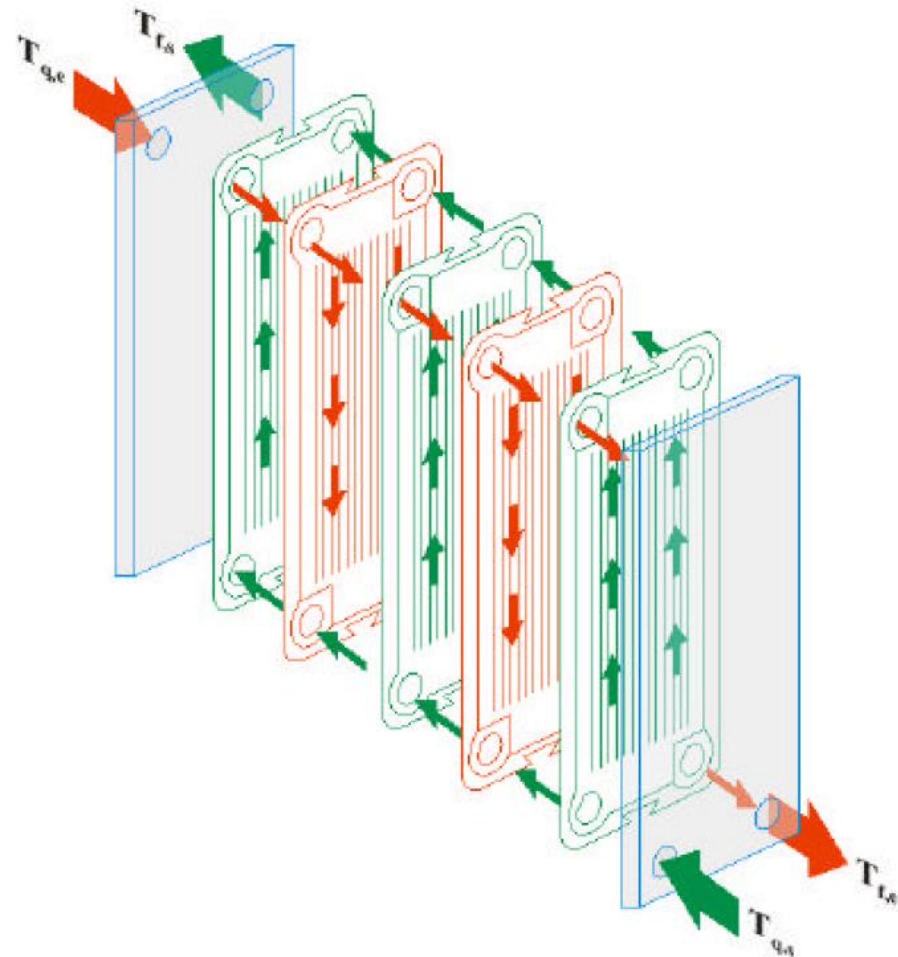
2) Trocador de Placas



http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/steam-consumption-of-heat-exchangers.asp

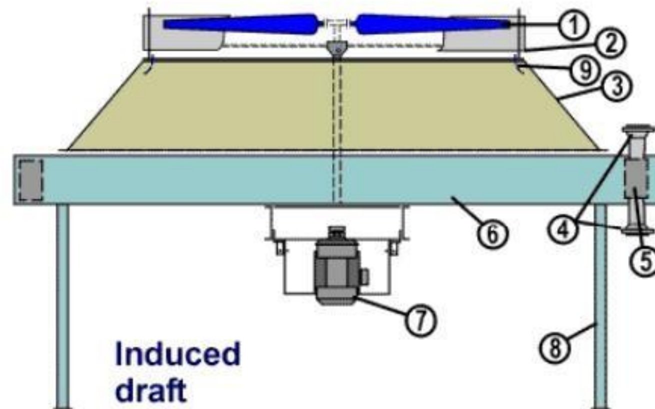


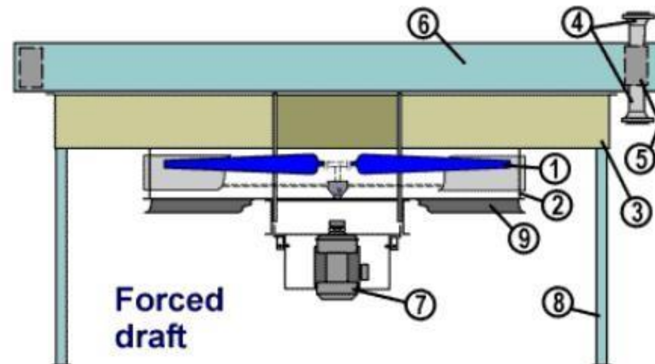
http://www.tranter.com/Pages/about-us/plate-heat-exchangers.aspx



Tipos de Trocadores de Calor

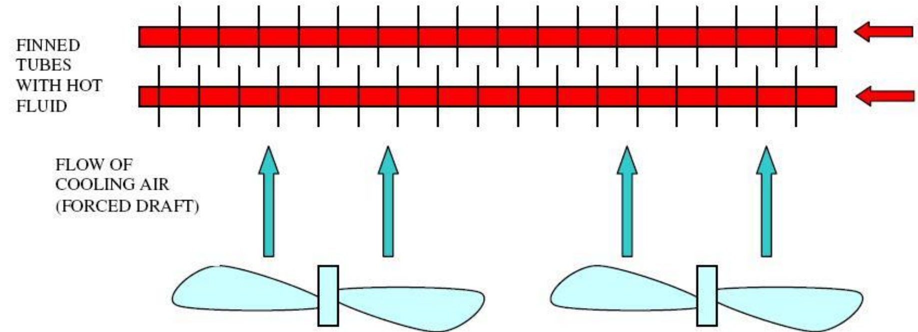
2) Air Cooler





1. Fan
2. Fan ring
3. Plenum
4. Nozzle
5. Header
6. Tube bundle
7. Drive assembly
8. Column support
9. Inlet bell

http://www.pramukhengineering.com/heatexchange.html



http://www.enggcyclopedia.com/2011/05/heat-exchanger-types/



http://www.decometa.com/CMS/index.php/en/Air-cooled-heat-exchangers---Process-Coolers/Air-cooled-heat-exchangers

Coeficiente Global de Transferência de Calor

Considerando convecção em um fluido, condução na parede sólida (plana ou cilíndrica) e convecção no outro fluido, temos para o coeficiente global de transferência de calor:

$$\frac{1}{UA}=\frac{1}{U_c A_c}=\frac{1}{U_h A_h}=\frac{1}{(hA)_c}+R_w+\frac{1}{(hA)_h}$$

Porém, pode haver deposição e/ou incrustação decorrentes de impurezas contidas nos fluidos ou mesmo de reações entre o fluido e o material da parede (*fouling*) que irão aumentar a resistência à transferência de calor entre os fluidos. Essa resistência térmica é chamada de fator de incrustação R''_f. Seu valor depende de temperatura de operação, velocidade do fluido e comprimento útil do trocador. Levando isso em consideração, o coeficiente global fica:

$$\frac{1}{UA}=\frac{1}{U_c A_c}=\frac{1}{U_h A_h}=\frac{1}{(hA)_c}+\frac{R''_{f,c}}{A_c}+R_w+\frac{R''_{f,h}}{A_h}+\frac{1}{(hA)_h}$$

Coeficiente Global de Transferência de Calor

Podemos ainda considerar a presença de aletas. Nesse caso, de modo a considerar a resistência por incrustação também, temos:

$$q = \eta_0 hA(T_b - T_\infty) = \eta_0 hA\theta_b$$

O coeficiente global de transferência de calor no trocador então fica:

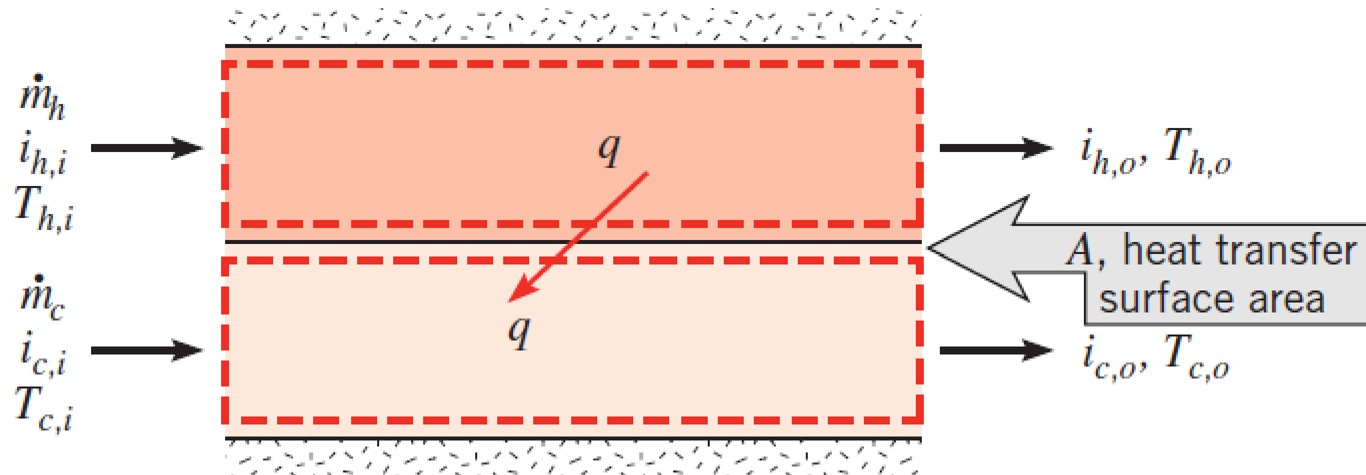
$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{(\eta_0 hA)_c} + \frac{R''_{f,c}}{(\eta_0 A)_c} + R_w + \frac{1}{(\eta_0 hA)_h} + \frac{R''_{f,h}}{(\eta_0 A)_h}$$

em que η_0 é a eficiência global da superfície aletada, dada por:

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_a}{A}(1 - \eta_a)$$

Sendo A a área total (aleta + base exposta), A_a a área das aletas e η_a a eficiência de uma aleta.

Média Logarítmica da Temperatura



$$q = m_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \longrightarrow q = m_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \Rightarrow C_h = \frac{q}{T_{h,i} - T_{h,o}}$$

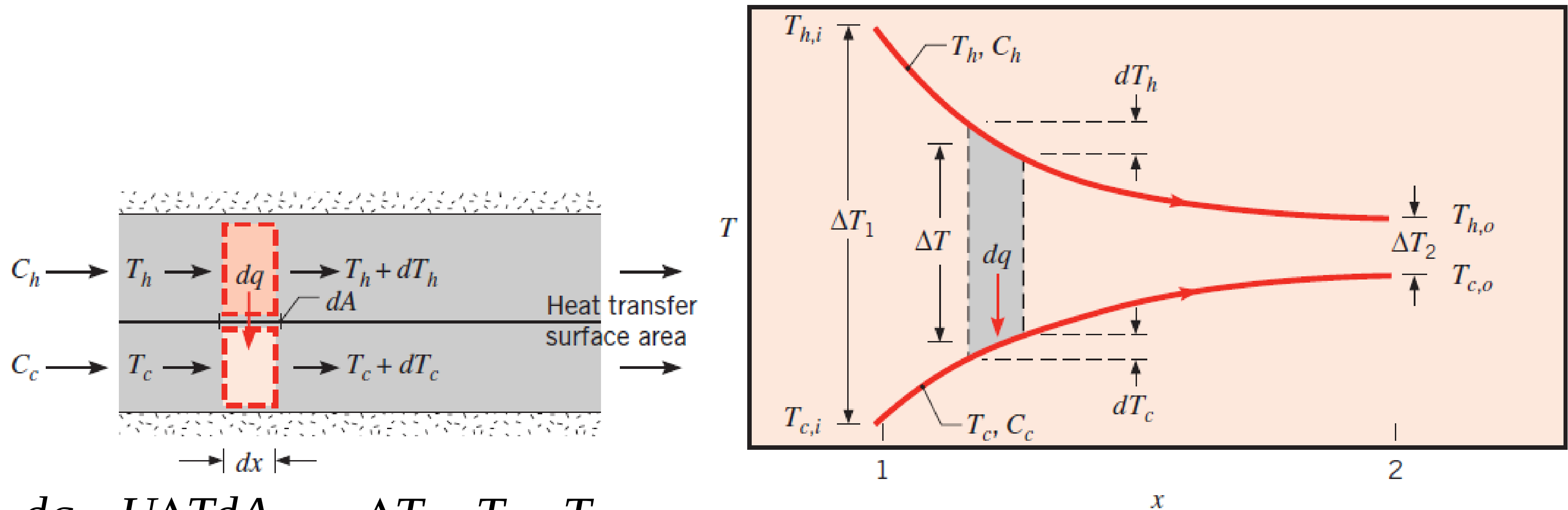
$$q = m_c(i_{c,o} - i_{c,i}) \longrightarrow q = m_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) \Rightarrow C_c = \frac{q}{T_{c,o} - T_{c,i}}$$

Podemos também relacionar q com a diferença de temperatura entre os fluidos $\Delta T = T_h - T_c$:

$$q = UA\Delta T_m$$

Média Logarítmica da Temperatura

Correntes Paralelas



$$dq = U\Delta T dA \qquad \Delta T = T_h - T_c$$

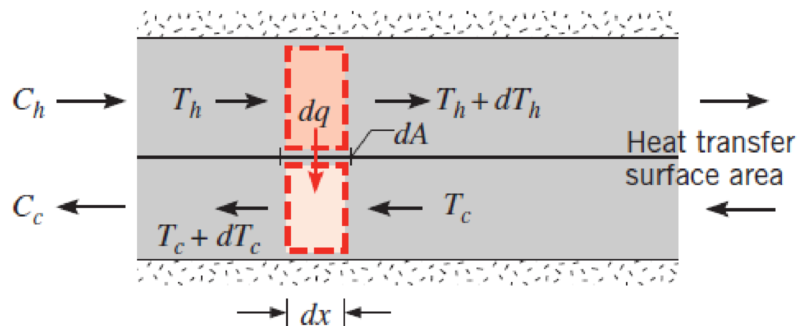
$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c = -\frac{dq}{C_h} + \frac{dq}{C_c} = -dq\left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c}\right)$$

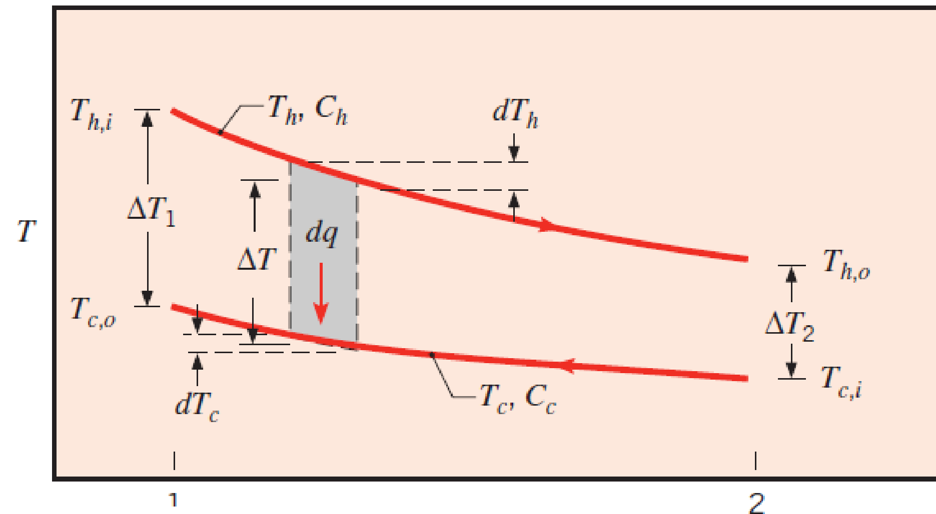
$$d(\Delta T) = -dq\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) = -U\Delta T\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right)dA \Rightarrow \int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right)\int_1^2 dA$$

$$\ln\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) = -UA\left(\frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} + \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{q}\right) \Rightarrow q = UA\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

Média Logarítmica da Temperatura

Correntes Contrárias





$$dq = U\,\Delta T\,dA$$

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \qquad \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

$$d(\Delta T) = -dq\left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c}\right)$$

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U\left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c}\right)\int_1^2 dA$$

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA\left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c}\right) = -UA\left(\frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} - \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{q}\right) \Rightarrow q = UA\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

Média Logarítmica da Temperatura

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)}$$

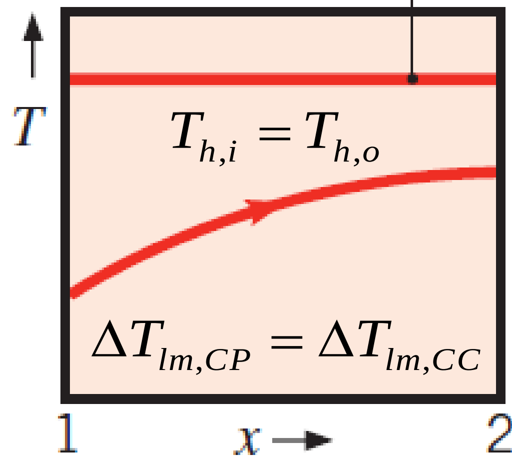
Correntes Paralelas:

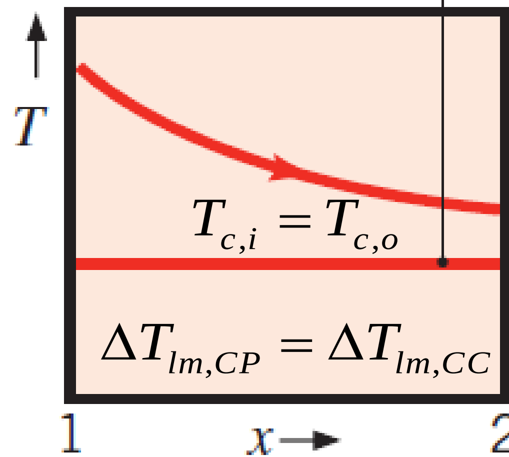
$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o} \end{bmatrix}$$

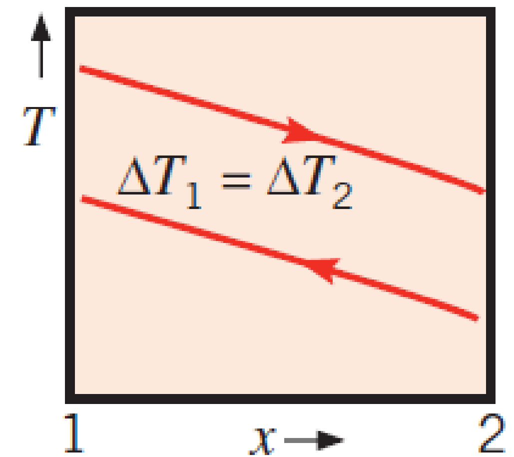
Correntes Contrárias:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i} \end{bmatrix}$$

Condições Especiais



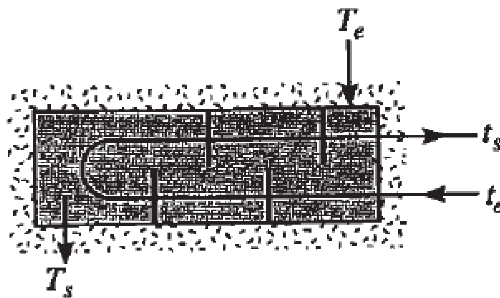


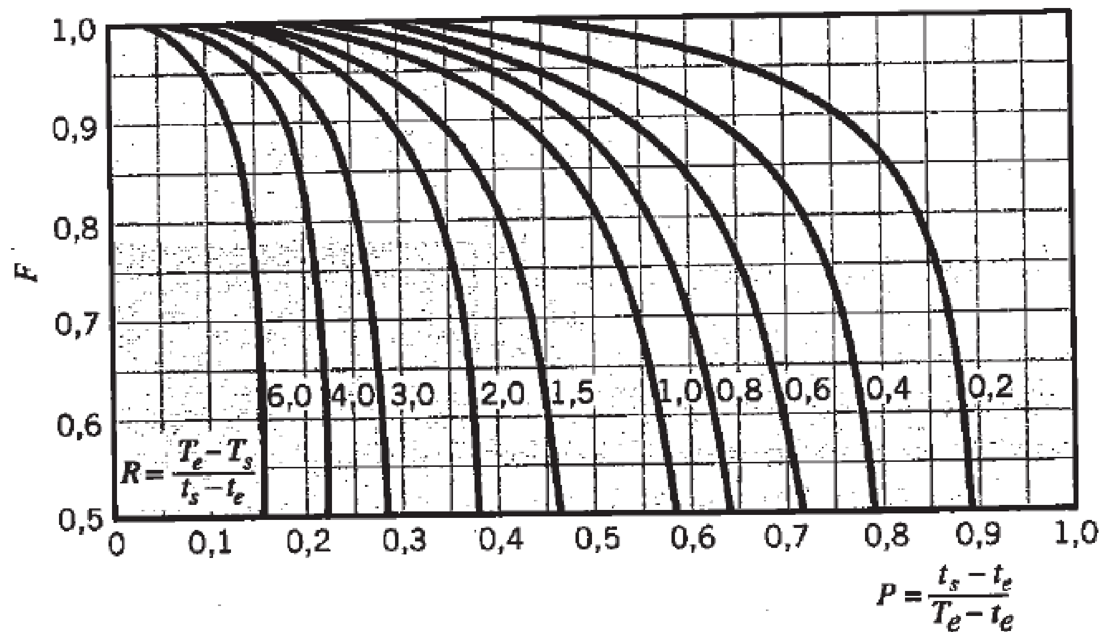


MLDT para Passes Múltiplos e Correntes Cruzadas

Para tipos diferentes de trocadores de calor, pode-se usar uma correção à média logarítmica da temperatura:

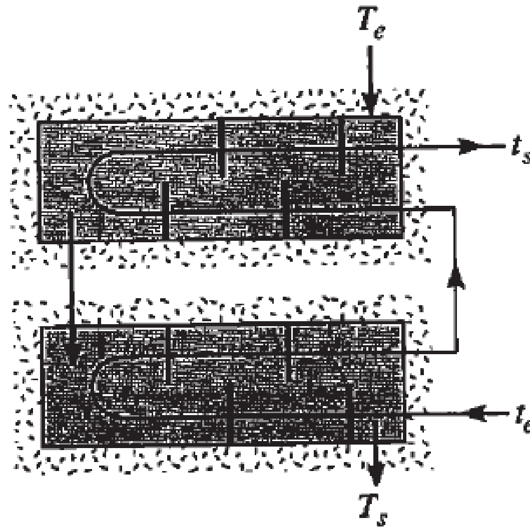
$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CC}$$



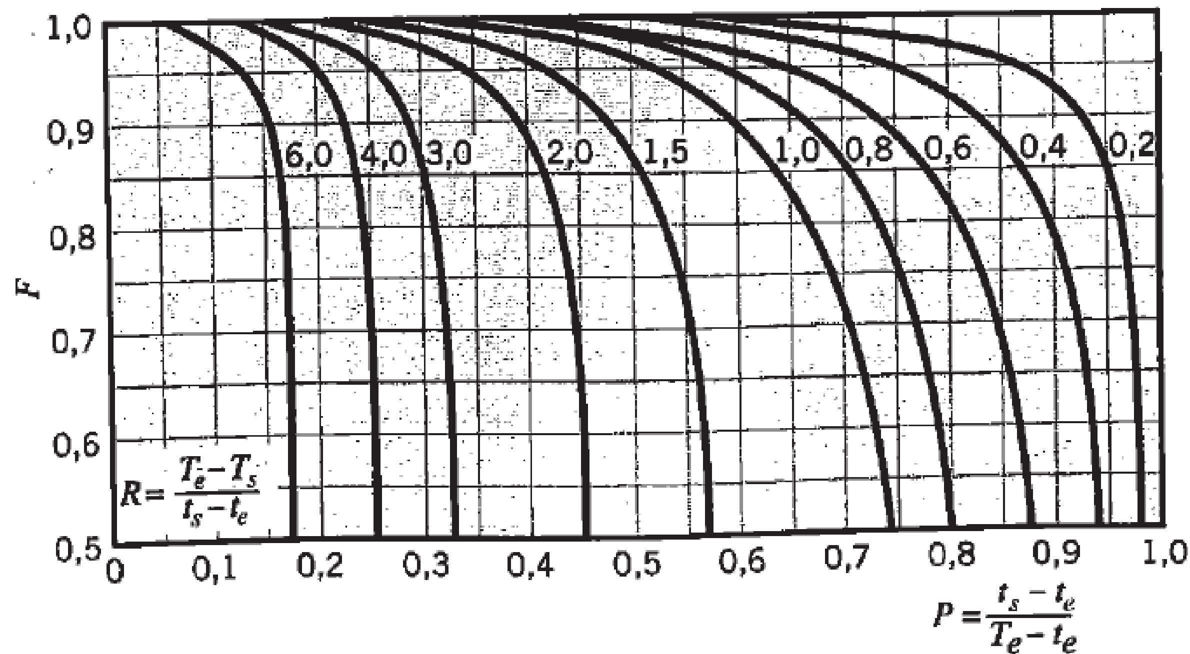


Fator de correção F para trocadores de calor casco e tubo com um passe no casco e múltiplo de dois passes nos tubos (dois, quatro, etc.)

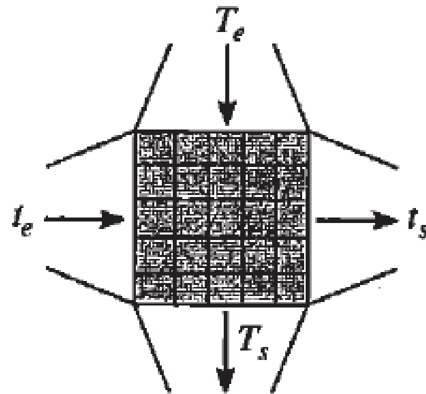
MLDT para Passes Múltiplos e Correntes Cruzadas



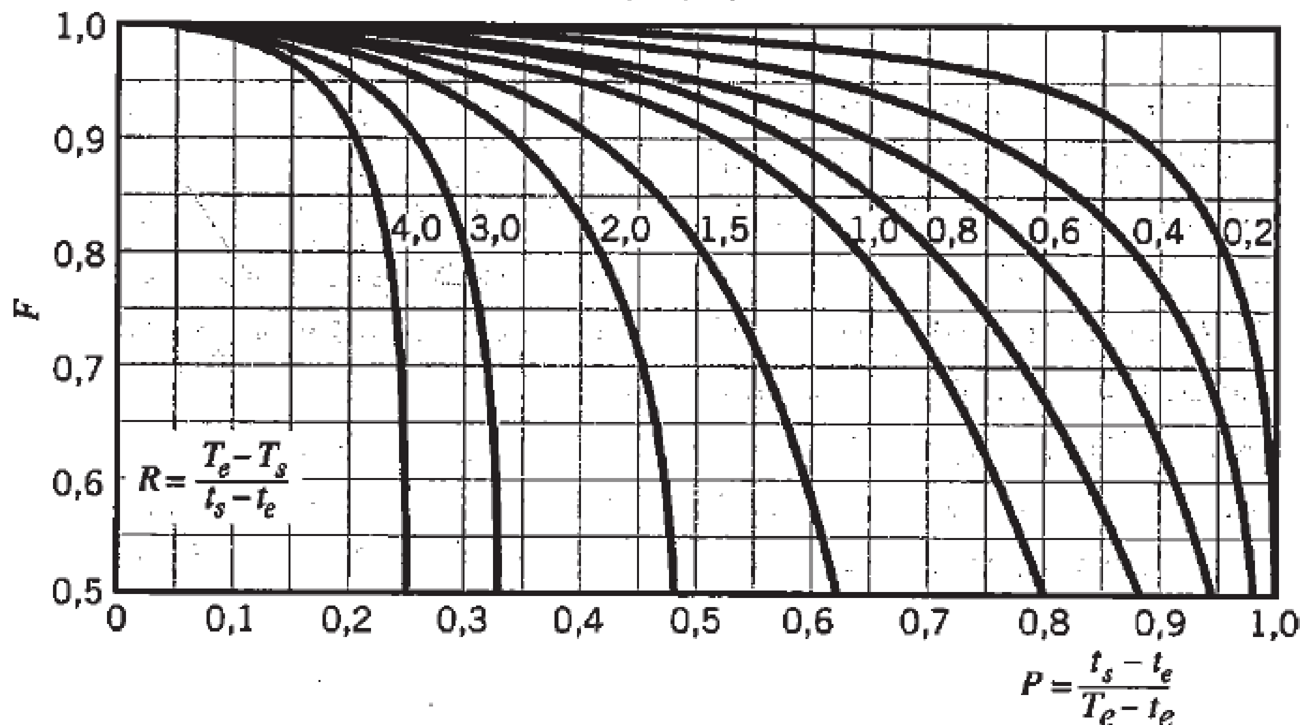
Fator de correção F para trocadores de calor casco e tubo com dois passes no casco e múltiplo de quatro passes nos tubos (quatro, oito, etc.).



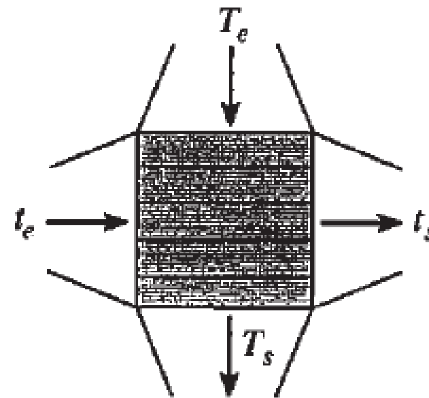
MLDT para Passes Múltiplos e Correntes Cruzadas



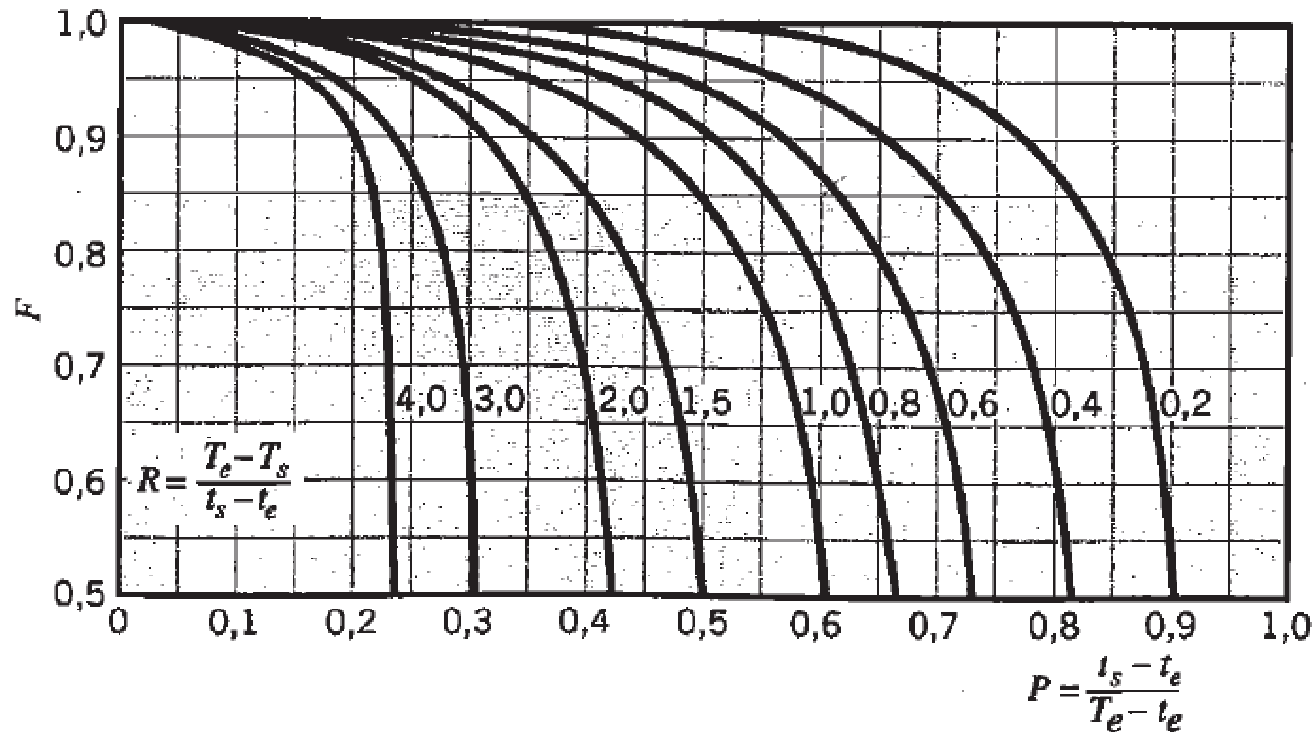
Fator de correção F para trocadores de calor de passe único com correntes cruzadas sendo os dois fluidos não misturados



MLDT para Passes Múltiplos e Correntes Cruzadas



Fator de correção F para trocadores de calor de passe único com correntes cruzadas sendo um fluido misturado e o outro não misturado.



Método da Efetividade de NUT

Para casos em que as temperaturas de saída não são conhecidas, o cálculo da média logarítmica torna-se iterativo. Uma outra possível abordagem para cáluculo de trocadores de calor, que elimina a necessidade de método iterativo nessas situações é o chamado método da efetividade de NUT.

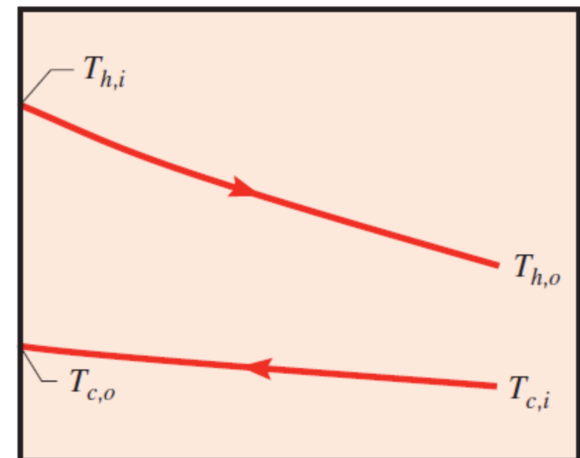
Efetividade $\varepsilon = \dfrac{q}{q_{\max}}$

$$q = C_c \Delta T_c = C_h \Delta T_h$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Taxa máxima de transferência de calor num trocador: $q_{\max}$

contra corrente



$$q_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})$$

Método da Efetividade de NUT

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \begin{cases} C_c < C_h \Rightarrow C_c = C_{\min} \Rightarrow \varepsilon = \dfrac{\cancel{C_c}(T_{c,o} - T_{c,i})}{\cancel{C_{\min}}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \dfrac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \\ C_h < C_c \Rightarrow C_h = C_{\min} \Rightarrow \varepsilon = \dfrac{\cancel{C_h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{\cancel{C_{\min}}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \dfrac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \end{cases}$$

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = C_c \Delta T_c = C_h \Delta T_h$$

Número de Unidades de Transferência: $\mathrm{NUT} \equiv \dfrac{UA}{C_{\min}}$

Pode-se então mostrar que: $\varepsilon = f\left(\mathrm{NUT}, \dfrac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$

Cálculo de Projeto: $T_{h,o}$ e $T_{c,o}$ → ε → NUT → A

Cálculo de Desempenho: A → NUT → ε → q → $T_{h,o}$ e $T_{c,o}$

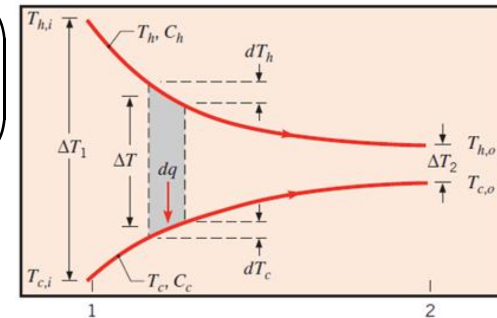
Método da Efetividade de NUT

Relações de Efetividade – Exemplo: trocador com **correntes paralelas** e $C_{min}=C_h$

$$\varepsilon = \frac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \qquad \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{C_h}{C_c} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_h} = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{h,o})}$$

Partindo da Equação CP:

$$\ln\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \Rightarrow \ln\frac{(T_{h,o} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} = -\frac{UA}{C_h}\left(1 + \frac{C_h}{C_c}\right)$$



$$\frac{(T_{h,o} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} = \exp\left[-\mathrm{NUT}\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]$$

$$\frac{(T_{h,o} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{(T_{h,o} - T_{h,i} + T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{(T_{h,o} - T_{h,i}) + (T_{h,i} - T_{c,i}) - (C_{\min}/C_{\max})(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})}$$

$$\frac{(T_{h,o} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} = -\varepsilon + 1 - \left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\varepsilon = 1 - \varepsilon\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

$$1 - \varepsilon\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) = \exp\left[-\mathrm{NUT}\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right] \Rightarrow \varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\mathrm{NUT}\left(1 + C_{\min}/C_{\max}\right)\right]}{\left(1 + C_{\min}/C_{\max}\right)}$$

Método da Efetividade de NUT

Relações de Efetividade

Flow Arrangement	Relation		
Parallel ow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 + C_r)]}{1 + C_r}$		(11.28a)
Counterow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$	
	$\varepsilon = \dfrac{\text{NTU}}{1 + \text{NTU}}$	$(C_r = 1)$	(11.29a)
Shell-and-tube			
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2\left\{1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \dfrac{1 + \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}\right\}^{-1}$		(11.30a)
n shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - 1\right]\left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - C_r\right]^{-1}$		(11.31a)
Cross-ow (single pass)			
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\dfrac{1}{C_r}\right)(\text{NTU})^{0.22}\{\exp[-C_r(\text{NTU})^{0.78}] - 1\}\right]$		(11.32)
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\dfrac{1}{C_r}\right)(1 - \exp\{-C_r[1 - \exp(-\text{NTU})]\})$		(11.33a)
C_{min} (mixed), C_{max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1}\{1 - \exp[-C_r(\text{NTU})]\})$		(11.34a)
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-\text{NTU})$		(11.35a)

Método da Efetividade de NUT

Relações NUT

$$NTU = f\left(\varepsilon, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)$$

Flow Arrangement	Relation		
Parallel ow	$NTU = -\frac{\ln[1-\varepsilon(1+C_r)]}{1+C_r}$		(11.28b)
Counterow	$NTU = \frac{1}{C_r - 1}\ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right)$	$(C_r < 1)$	
	$NTU = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$	$(C_r = 1)$	(11.29b)
Shell-and-tube			
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$(NTU)_1 = -(1+C_r^2)^{-1/2}\ln\left(\frac{E-1}{E+1}\right)$		(11.30b)
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1+C_r)}{(1+C_r^2)^{1/2}}$		(11.30c)
n shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with		
	$\varepsilon_1 = \frac{F-1}{F-C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1$		(11.31b, c, d)
Cross-ow (single pass)			
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right)\ln(1-\varepsilon C_r)\right]$		(11.33b)
C_{min} (mixed), C_{max} (unmixed)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right)\ln[C_r\ln(1-\varepsilon)+1]$		(11.34b)
All exchangers ($C_r = 0$)	$NTU = -\ln(1-\varepsilon)$		(11.35b)

Método da Efetividade de NUT

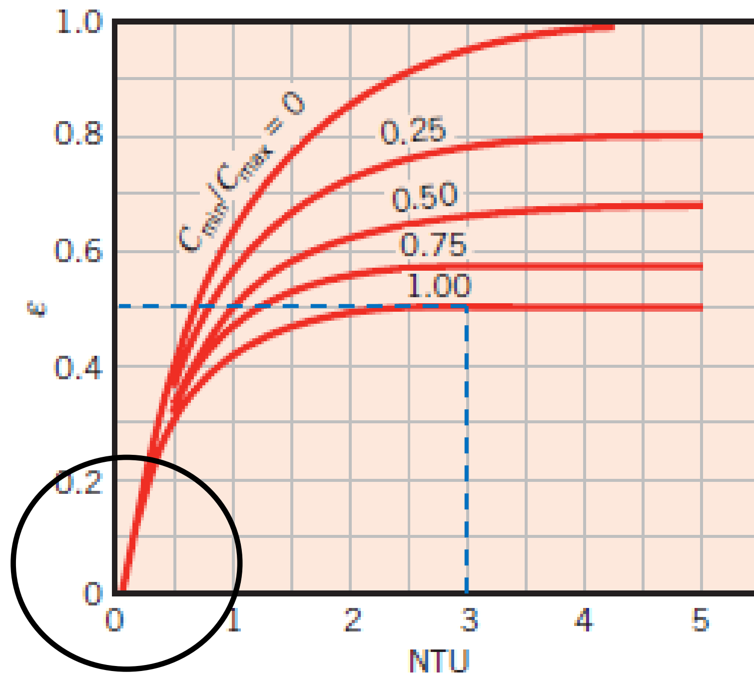


FIGURE 11.10 Effectiveness of a parallel-flow heat exchanger (Equation 11.28).

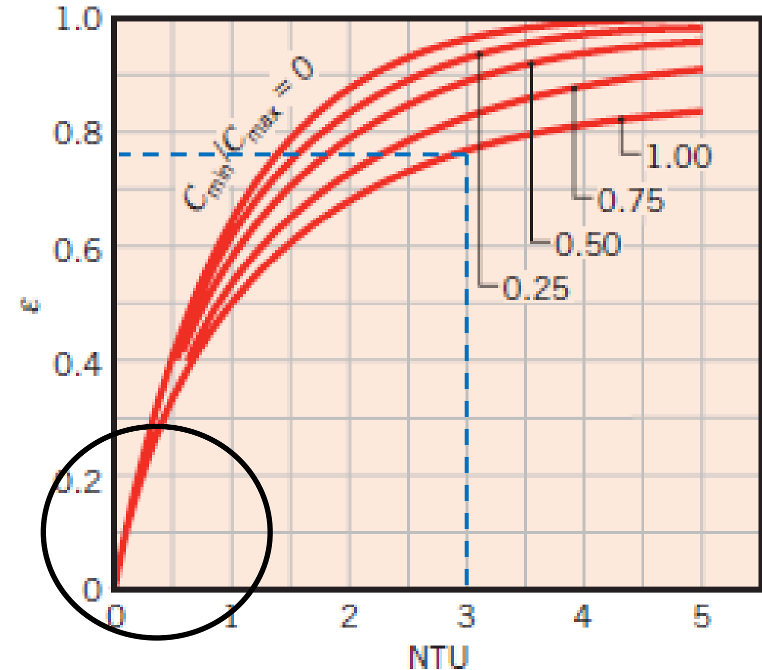


FIGURE 11.11 Effectiveness of a counterflow heat exchanger (Equation 11.29).

Método da Efetividade de NUT

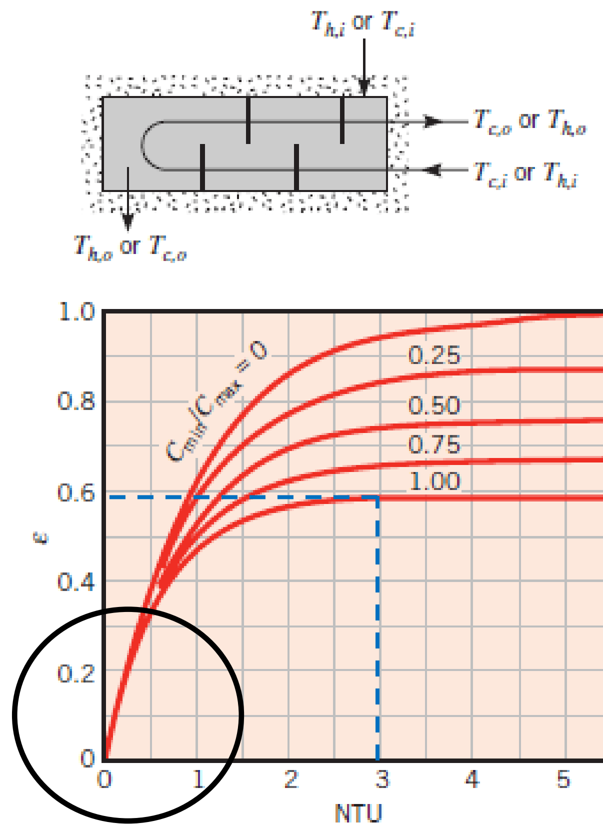


Figure 11.12 Effectiveness of a shell-and-tube heat exchanger with one shell and any multiple of two tube passes (two, four, etc. tube passes) (Equation 11.30).

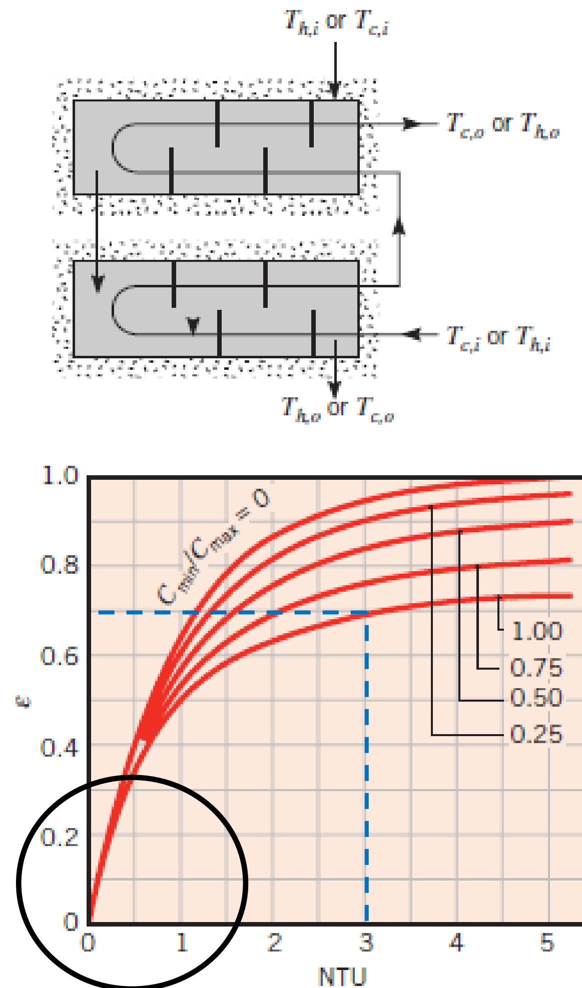
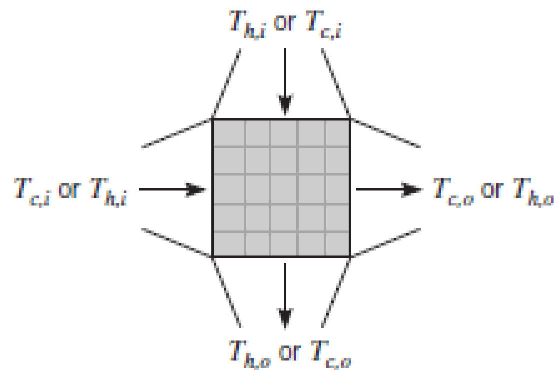


Figure 11.13 Effectiveness of a shell-and-tube heat exchanger with two shell passes and any multiple of four tube passes (four, eight, etc. tube passes) (Equation 11.31 with $n = 2$).

Método da Efetividade de NUT



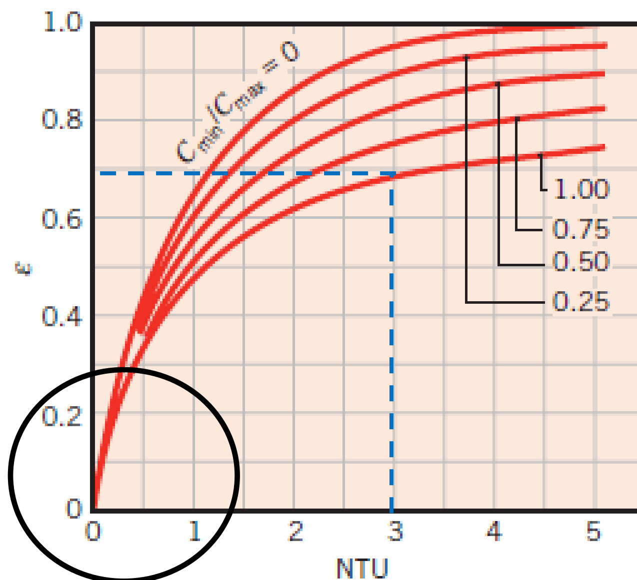
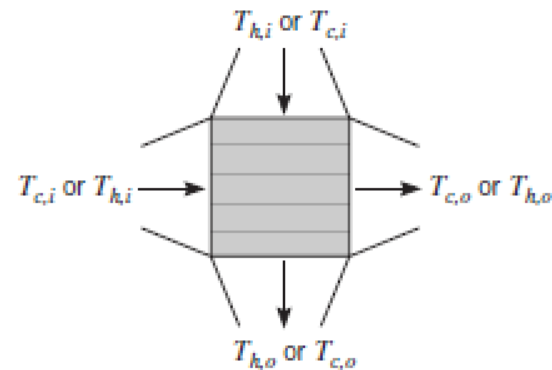


Figure 11.14 Effectiveness of a single-pass, cross-flow heat exchanger with both fluids unmixed (Equation 11.32).



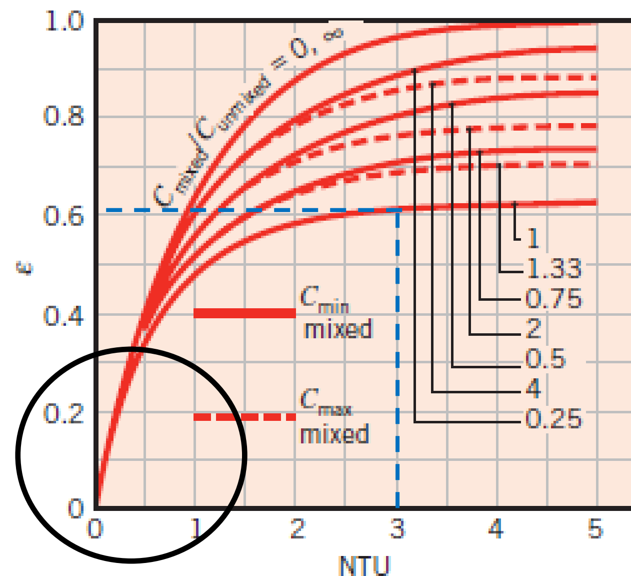


Figure 11.15 Effectiveness of a single-pass, cross-flow heat exchanger with one fluid mixed and the other unmixed (Equations 11.33, 11.34).

Método da Efetividade de NUT

<u>Observações dos gráficos:</u>

- Se C_r=0, todos os gráficos dão o mesmo resultado, correspondente à última linha das tabelas: $\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$ ou $NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$.

- Se NUT $\lesssim$ 0,25, ε é aproximadamente o mesmo para todos os trocadores (independe de C_r) e pode-se então usar as correlações mais simples para Cr=0 → última linha das tabelas: : $\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$ ou $NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$.

- Para C_r>0 e NUT>0,25, o trocador mais efetivo é o de correntes contrárias.

- Para qualquer trocador, ε máximo está associado à C_r=0 e ε mínimo, à C_r=1.

Metodologia de Cálculo de um Trocador

Problemas de projeto de trocadores de calor: temperaturas de entrada e saída conhecidas:

- tem-se q, U e pode-se cacular a média logarítmica da temperatura para determinar a área de troca térmica necessária.

OU

- calcula-se ε para achar NUT e assim determinar a área de troca térmica necessária.

Determinando-se o tipo de trocador, tem-se então sua geometria.

Problemas de cálculo de desempenho de trocadores de calor: tipo e tamanho do trocador são conhecidos → usa-se o método ε-NUT: conhecidos U e Cmin/Cmax, calcula-se NUT, acha-se ε, acha q e então determina-se as temperaturas de saída dos fluidos.